

エアロゾルが地上日射に与える影響

Impact of aerosols on the surface solar radiation

工藤 玲*

1. はじめに

エアロゾルは、大気中に浮遊する、数ナノメートルから数ミリメートルの大きさを持つ固体や液体の微粒子である。発生源は様々で、地表面での巻き上げ、海面の波しぶき、自動車の排気等の直接的な粒子の排出、そして、大気中のガスの凝結反応による二次的な生成がある。呼吸によって体内に取り込まれるエアロゾルの一部は、健康被害をもたらすことから、大気汚染問題にかかわる。また、地球温暖化問題にもかかわってくる。地球の気候は、大気に入射する太陽光と大気から射出される赤外放射との放射エネルギーの収支によって決定される。エアロゾルは、太陽光を直接吸収する効果と散乱する効果によって、この放射収支に大きな影響を持つ（エアロゾル-放射相互作用）。また、雲核として雲の性質を変化させることによって、放射収支に影響を与えている（エアロゾル-雲相互作用）。これらの効果は、概ね大気を冷やす効果を持つと見積もられており、二酸化炭素等の温暖化物質に対抗するものとして評価されている¹⁾。しかし、エアロゾルの気候変動への影響評価には、まだ大きな不確実性が残っている。エアロゾルは、砂漠、海、工場、自動車、森林火災等の、様々な排出起源を持つ。また、ダスト、海塩、硫酸塩、硝酸塩、有機物、黒色炭素等の多種多様な種類、形状、混合状態を有している。さらに、大気中での寿命は数日～1週間くらいである。このため、時空間変動が大きく、その全容を把握すること、予測することは非常に難しい。このことが、不確実性の要因となっている。

気候変動においては、変動要因が大気上端での放射収支をどう変化させるかが焦点となる。しかし、エアロゾルが太陽光を吸収・散乱させる効果は、大気上端よりも大気下端、すなわち、地上日射量に最

も大きな影響を与える。地上日射量の変動は、大気境界層内の物理過程を通して、大気の熱循環、水循環、物質循環、雪氷の融解、そして、太陽光発電にも影響を与える。ここでも、エアロゾルの時空間変動を把握することが重要になってくる。

エアロゾルが、太陽光を吸収・散乱する効果は、次の3つの光学特性によって決定される。

(1) 光学の厚さ。エアロゾルを透過する放射エネルギーは、エアロゾルによる消散（吸収と散乱）によって指数関数的に減少する、 $\sim \exp(-\tau)$ （ビーア・ブーゲー・ランバートの法則）。この時の τ が光学の厚さである。主に、エアロゾルの量に比例して大きな値を取る。

(2) 一次散乱アルベド。エアロゾルの光吸収性を表すパラメータ。0から1の値を持ち、小さい値ほど光吸収性が強いことを示す。黒色炭素やダスト粒子などが持つ一次散乱アルベドは小さく、光吸収性が強い粒子とされている。

(3) 位相関数（または非対称因子）。入射された放射のエネルギーを、散乱によってどの方向へどれだけ配分するかを表す。また、位相関数の積分によって得られる非対称因子は、-1から1の値を持ち、値が大きいほど、前方への散乱が強いことを表す。地球大気の場合、宇宙から地表面に向かって太陽光が入射するため、値が大きいほど地表面へ散乱されるエネルギー量が大きいことになる。ダストや海塩粒子のように、粒径が大きい粒子の場合、光の回折による前方への散乱が増えるため、値が大きくなる。

これらの3つの光学特性と地上日射量の減少量は、概ね図1のような関係にある。これは、つくば市における地上観測の結果から得られたものである²⁾。地上日射の減少量は、光学の厚さに比例する。また、

* 気象庁 気象研究所

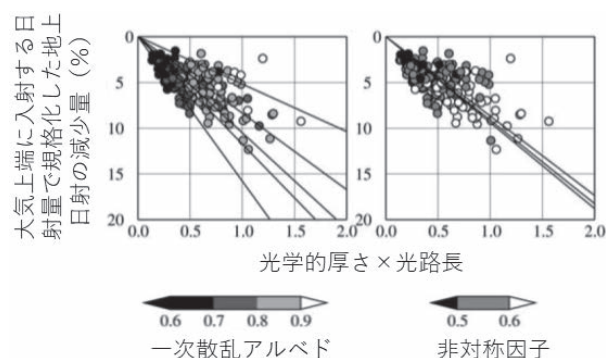


図1 光学厚さ、一次散乱アルベド、非対称因子と地上日射の減少量との関係。縦軸の地上日射の減少量は、大気上端に入射する日射量で規格化している。横軸は、光学厚さと光路長をかけたものである。それぞれの図中の直線は、濃淡で記した一次散乱アルベドと非対称因子の階級ごとに求めた線形回帰である。

その傾きは、一次散乱アルベドに依存していることが分かる。非対称因子は、変動幅が小さいこともあり、傾きへの影響は小さい。この傾きは、放射強制力の効率（Forcing efficiency）と呼ばれるが、IPCCで用いられている放射強制力とは定義が異なり、紛らわしいため、本稿では、この傾きの事を地上日射減少の効率と呼ぶことにする。

以上のように、地上日射の減少量を決定づける3つの光学特性の時空間変動を調べることが、エアロゾルの気候変動、地上日射への影響を評価していく上で重要になってくる。本稿では、3つの光学特性とその地上日射への影響に関して、季節変動（2章）、数十年規模の長期変動（3章）、全球分布（4章）の解析例を紹介する。

2. 季節変動

快晴下において、大気を通して地上に到達する太陽光は、直達光と散乱光に分けて観測することができる。直達光の減少量は、エアロゾルの光学厚さに依存する。一方、散乱光は、光学厚さ、一次散乱アルベド、位相関数に依存する。また、直達光と散乱光のスペクトルにも、一次散乱アルベドと位相関数の情報が含まれる。大雑把に述べたが、このような関連性を利用して、太陽直達光と散乱光のスペクトル観測からエアロゾルの3つの光学特性を推定することが出来る。

著者らは、気象研究所（つくば市）において、2004年から2008年にかけて行った分光放射計による太陽直達光と散乱光の観測データを解析し²⁾、エアロゾル光学特性の季節変動を見積もった（図2）。同時に、日射計によって測定した地上日射量の変動

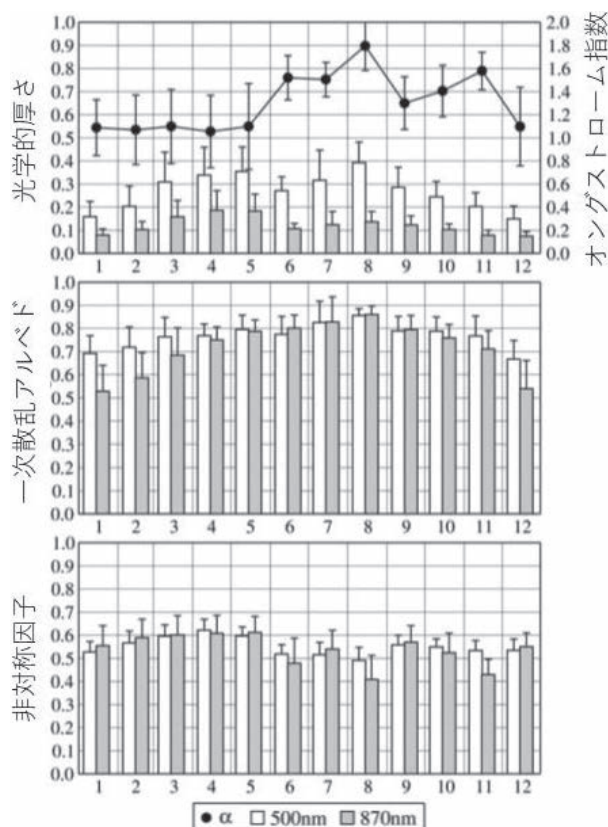


図2 波長500nmと870nmにおける光学厚さ、一次散乱アルベド、非対称因子、オングストローム指数の月平均値。

をあわせて解析した（図3）。この結果、以下の特徴が見いだされた。なお、図2のオングストローム指数は、光学厚さの波長依存性から導出される指数で、値が小さいほど、エアロゾルの粒径が大きいことを表す。

(1) 波長500nmの光学厚さは0.1から0.5の幅を持ち、春夏に大きく、冬季に小さい。春季は大陸から飛来する黄砂によって増加する。夏季の高温多湿な環境は、ガスから粒子への二次生成を加速させる。オングストローム指数は、冬春に小さく、夏秋に大きい。この変動は、粒径の大きい黄砂などの土壌粒子と、粒径の小さい二次生成粒子に対応する。

(2) 波長500nmの一次散乱アルベドは0.6から0.95の幅を持ち、夏季に高く、冬季に小さい。夏季に増える二次生成粒子の多くの種類は、光吸収性が弱い。一方、冬季には、化石燃料の消費を起源とした粒子が相対的に多くなる。これらの粒子には、黒色炭素が多く含まれる。黒色炭素は、光吸収性が強く、一次散乱アルベドは0.2程度である³⁾。

(3) 波長500nmの非対称因子は0.5から0.7で変動し、春季に大きい。春季のピークは、粒径の大きい黄砂が飛来することが要因である。

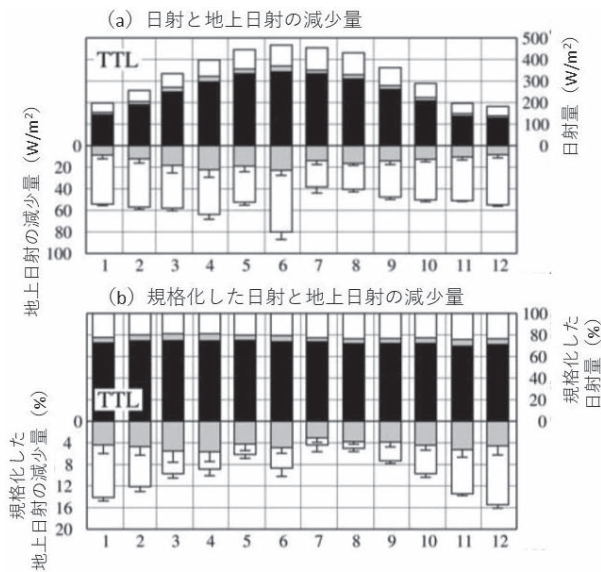


図3 (a)の上段は、大気上端の日射の計算値(白)、エアロゾルが無いと仮定して計算した地上日射(灰色)、観測された地上日射(黒)の月平均値。下段は、エアロゾルによる地上日射の減少量(灰色)とその効率(白)の月平均値。(b)は、(a)と同じだが、大気上端の日射量で規格化している。

(4) 地上日射の減少量は10から30 W/m^2 で、大気に入射する太陽光が強く、光学の厚さが大きくなる夏季に大きい。地上日射減少の効率は、40～90 W/m^2 で、季節に応じた変動傾向ははっきりしていない。しかし、大気上端への太陽光の入射量で規格化すると(図3b)、地上日射減少の効率は、夏季に小さく、冬季に大きいことが分かる。これは一次散乱アルベドと同じ季節変動を示している。また、地上日射の減少量の季節変動は小さくなり、年間を通して、約5%になる。このことから、冬季のエアロゾルは光吸収性が強く、光学の厚さが小さくても(量が少なくても)、効率的に日射を減少させていると解釈することができる。エアロゾルによって吸収された日射のエネルギーは、大気を直接暖めることに費やされる。

上記はつくば市の観測結果であるが、様々な文献で報告されている東アジアから東南アジアの各地の観測結果をまとめると²⁾、光学の厚さは、日本で0.1～0.5、大陸(モンゴル、中国、タイ)で0.1～1.3の大きな値が観測されている。一次散乱アルベドは、日本で0.65～0.95、大陸で0.87～0.95。日本の方が冬季に小さい値を取る傾向があった。どの地点も季節変動は、概ね、図2と同様の傾向を持っていた。

光学特性は、エアロゾルの種類、形状、混合状態によって大きく異なる。このため、光学特性の変動要因を解析するためには、種類毎に定量化する解析

手法が必要になる。スカイラジオメータは、太陽直達光と散乱光の分布を分光測定する測器である。これ一台で、光学の厚さ、一次散乱アルベド、位相関数を導出することが可能である⁴⁾。また、SKYNET⁵⁾という国際的なネットワーク観測網が敷かれている。気象庁でも2016年度より現業観測を展開し始めている。著者らは、SKYNETで使われている解析手法を発展させ、粒径と光吸収性の異なる4つのカテゴリーに分類したエアロゾル組成を導出することを可能にした⁶⁾。4つのカテゴリーは、サイズが小さく、光吸収性の弱い水溶性粒子³⁾(硫酸塩、硝酸塩、有機物などの混合)と光吸収性の強い光吸収性粒子⁷⁾(黒色炭素と水溶性粒子の内部混合)、サイズが大きく、光吸収性が弱い海塩粒子と光吸収性が強いダスト粒子(黄砂等の土壌粒子)である。図4は、2014年の気象研究所における観測データから得られた光学特性と組成解析の結果である。光学の厚さ、一次散乱アルベド、非対称因子は、概ね図2と同じ季節変動を示している。光学の厚さに占める4組成の比率は、年間を通して、水溶性粒子が50%以上を占める。冬季を中心に光吸収性粒子とダスト粒子の割合が増加し、一次散乱アルベドが下がる。また、太平洋高気圧に覆われる夏季を中心に、海塩

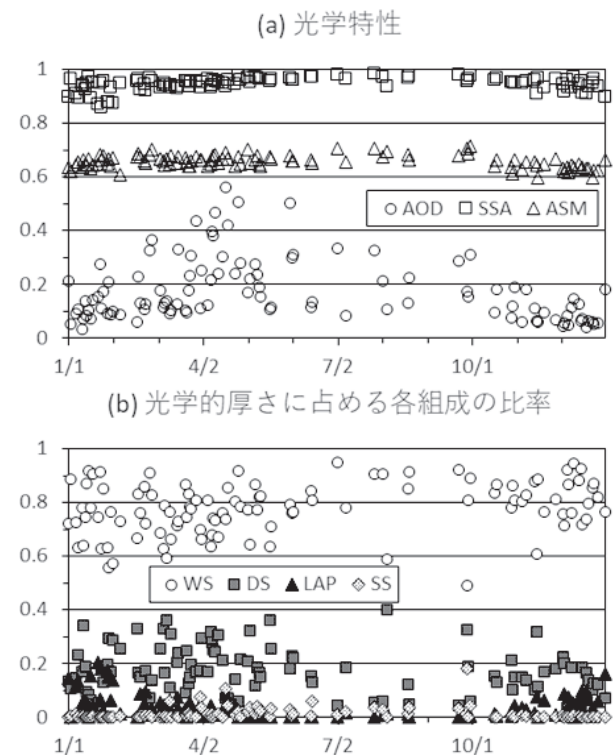


図4 (a) エアロゾルの光学の厚さ(AOD)、一次散乱アルベド(SSA)、非対称因子(ASM)の日平均値。(b) 光学の厚さに占める水溶性(WS)、光吸収性(LAP)、ダスト(DS)、海塩粒子(SS)の比率。

粒子が見られる。このように、組成毎の情報が得られると、光学特性の変動要因が明確になる。

3. 数十年規模変動

地上日射の観測は、1950年代の国際観測年以降、今日まで世界各地で行われている。これまでの観測から、先進国を中心に、地上日射量は1950～1980年代にかけて減少傾向にあり（Global dimming）、その後、2000年代までは増加傾向に転じている（Global brightening）ことが分かっている⁸⁾。さらに、ストックホルムには、1920年代からの観測あり、その解析結果によると、1920～1950年代にかけて増加傾向（Early brightening）にあったことが判明している。国や地域ごとに調べられた変動量⁹⁾を、1950年代～1980年代、1980年代～2000年、2000年以降の三期間に分けて示すと、アメリカで $-6 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $+5 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $+8 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、ヨーロッパで $-3 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $+2 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $+3 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、中国・モンゴルで $-7 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $+3 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $-4 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、日本で $-5 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $+8 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $0 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、インドで $-3 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $-8 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 、 $-10 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 。先進国では増加傾向に転じているが、発展途上国では減少傾向が続いている。これらの数十年規模変動の要因について、様々な研究がなされており、主要因として挙げられているが、人為起源エアロゾルと雲の変動である。

著者らは、気象庁が1976～2008年にかけて日本14地点で観測してきた太陽直達光と散乱光のデータからエアロゾルの光学的厚さと一次散乱アルベドを導出し、その長期変動と地上日射への影響を調べた¹⁰⁾（図5）。その結果、光学的厚さの減少（ -0.02 ）と一次散乱アルベドの増加（ $+0.21$ ）によって、地上日射が増加（ $+5\%$ ）していたことが分かった。また、5%の増加の内、光学的厚さ減少の寄与は $+1\%$ 、一次散乱アルベドの寄与は $+4\%$ であり、エアロゾルの光吸収性の変動が重要であることが分かった。一次散乱アルベドを下げる主要因は、黒色炭素の割合が増えることである。日本では、1962年に「ばい煙の排出の規制などに関する法律」、1968年に大気汚染法が制定されている。このような大気汚染対策が進められたことが要因と推測される。

2000年代になると、光学的厚さの減少は概ね頭打ちになっており、一次散乱アルベドにも大きな変化はみられていない。このままの傾向が続くかどうか

か、動向を見守っていくことが必要である。

4. 全球分布

エアロゾルの気候変動への影響評価には、まだ多くの不確定さが残っている。この要因の一つに、海上などの観測が困難な地域の情報不足しているという事情もある。衛星観測は、このような場所もカバーし、全球の情報を得ることが出来る。A-Trainは、アメリカ、フランス、日本によって行われている地球観測の衛星コンステレーションである。異なる測器を搭載した多数の衛星が、同じ軌道上で大気観測を行う。この衛星群の内、Aqua衛星には分光放射計（MODIS）が、CALIPSO衛星にはライダー（CALIOP）が搭載されている。MODISからは、エアロゾル光学特性の気柱積算（または平均）の情報が含まれている。ライダーには、エアロゾル光学特性の鉛直分布の情報が含まれている。著者らは、これらのデータを複合的に解析することで、エアロゾル組成の全球三次元分布を導出する手法を開発した¹¹⁾。導出される組成は、2章で述べたものと同じ水溶性、光吸収性、ダスト、海塩粒子の4つである。図6は、2010年の解析例である。エアロゾル光学的厚さの全球平均は0.145であった。この結果は、NASAのMODISとCALIOPのそれぞれの標準プロダクトの値、0.164と0.106の間になる。著者らの結果が、MODISとCALIOPの複合プロダクトであることを考慮すると妥当な結果である。組成毎の全球平均値は、水溶性粒子が0.073、光吸収性粒子が0.020、ダストが0.026、海塩が0.026であり、水溶性粒子が半分近くを占める。水平分布をみると、東アジアからアフリカにかけて、そして、南アメリカで大きな値が示されている。これらは、都市域、砂漠、森林火災の頻発地などに対応している。特に大きな値を示していたのが東アジアで、水溶性粒子とダスト粒子が卓越していたことから、都市部の人為起源物質と砂漠起源の粒子が、大きな光学的厚さの要因であることが分かる。鉛直分布をみると、そのほとんどは高度2km内の大気境界層内に存在する。しかし、北半球の低中緯度を中心に、海塩粒子以外は、高度5kmほどにもみられる。これらは、長距離輸送されるエアロゾルであり、北半球の低中緯度から排出されたエアロゾルが全球に広がって輸送される様子が分かる。

これらのエアロゾルによる地上日射への影響量を見積もると（図7）、全球平均で地上日射は 10 W/m^2 減少していた。そして、日射の減少量の水平分

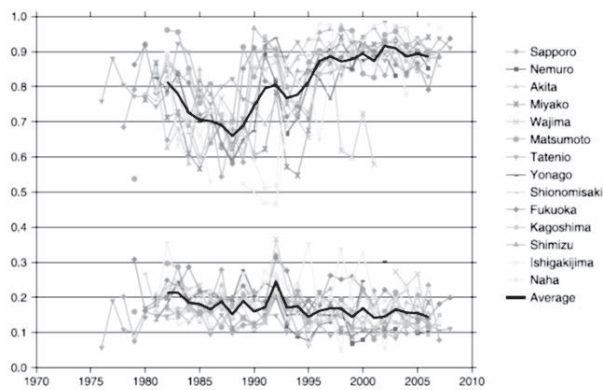


図5 国内14地点の光学的厚さ(下)と一次散乱アルベド(上)の年平均値。黒実線は14地点の平均。

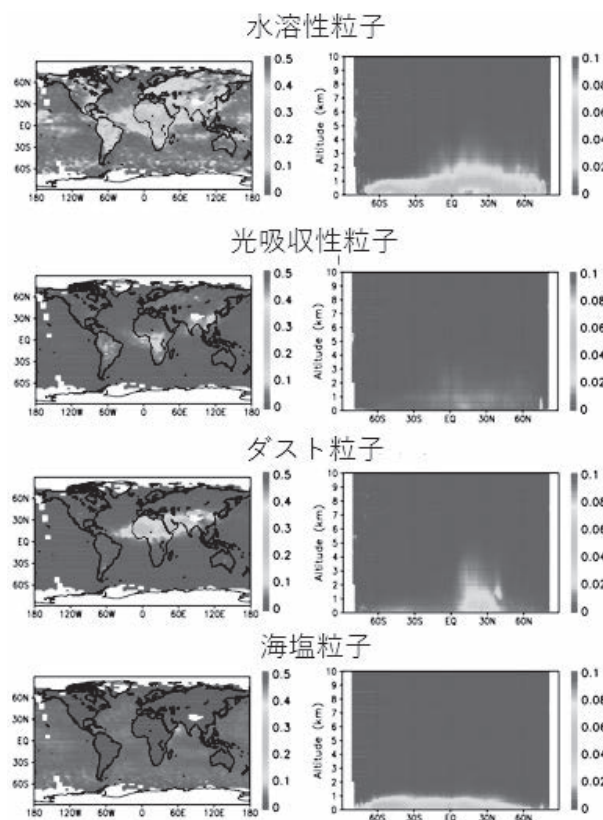


図6 水溶性、光吸収性、ダスト、海塩粒子の光学的厚さの水平分布(左)と消散係数(1/km)を緯度ごとに東西平均した鉛直分布(右)の2010年の平均値である。消散係数を鉛直積分したものが光学的厚さになる。

布は、光学的厚さの大きい東アジアからアフリカにかけて、そして、南アメリカで大きい。最も大きい東アジアでは、約 50 W/m^2 減少していた。

MODIS と CALIOP の衛星観測データは、2007年からある。現在これらのデータを使って、長期変動の解析を進めているところである。また、2021年に打ち上げ予定の JAXA, NICT, ESA の共同プロジェクト EarthCARE 衛星にも、ライダーと分光放射計が搭載される。本解析手法は、JAXA が公開

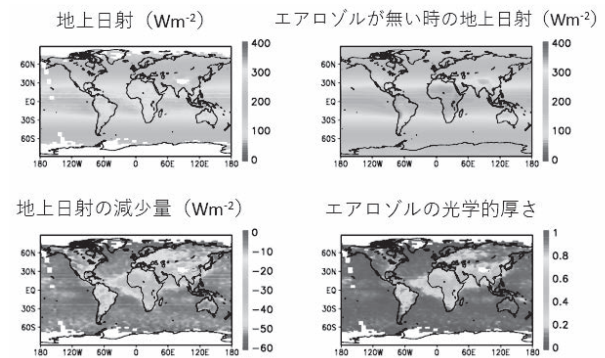


図7 地上日射, エアロゾルが無い時の地上日射, エアロゾルによる地上日射の減少量, エアロゾルの光学的厚さの2010年の平均値。日射は、快晴時の計算結果である。



図8 開発した全天カメラ(左)と太陽追尾装置に搭載した様子(右)。

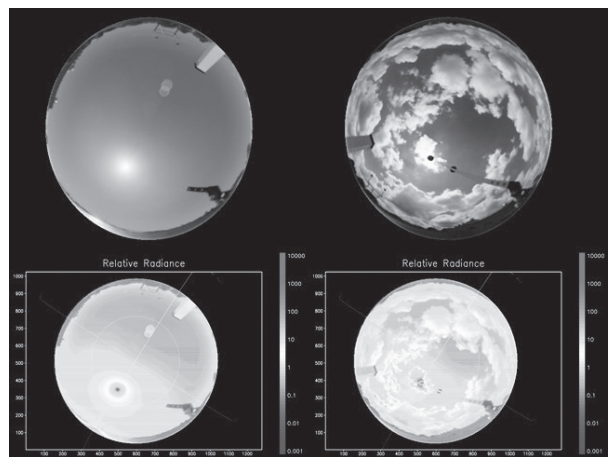


図9 快晴時(左列、2018年6月7日14時0分、気象研究所にて撮影。太陽がある方位は概ね西南西、左上にある建物は概ね南。)と、積雲時が散在した時の観測結果(右列、2018年6月19日10時0分、気象研究所にて撮影。太陽がある方位は概ね東南東。)。カラー写真(上段)と天頂輝度で規格化した輝度分布(下段)。

するプロダクトとして EarthCARE 衛星に応用される予定である。

5. 全天カメラの開発

大気の放射収支に最も大きな影響を持つものは、雲である。しかし、その影響評価は、最も不確定性が高い。また、太陽光発電においても、雲の影響評価と予測は難問の一つである。この不確定性をもたらす要因の一つが、雲の三次元分布の不均質性とそれに伴う三次元放射効果である。三次元放射効果は、一次元の大気放射伝達では表せない、雲の側面からの散乱や、影の効果の事を指す。この問題を解決するためには、雲の分布と散乱輝度の分布そのものを観測することが鍵になると考え、雲の全天分布と輝度分布を測定する新しい全天カメラを開発している¹²⁾。

一般に、青空から太陽光の輝度は、5～6桁の範囲を持つ。しかし、市販のカメラに用いられている画像センサーのダイナミックレンジは、大きくても4桁ほどである。著者ら、7桁ほどのダイナミックレンジを持ち、太陽直達光も飽和せずに測定することが出来る産業用の広ダイナミックレンジのCMOSセンサーに、魚眼レンズを搭載した全天カメラを開発した(図8)。そして、CMOSセンサーの画素ごとの感度ムラ、内部パラメータ(CMOSセンサーの光軸、レンズの焦点距離、ひずみ等)、魚眼レンズによる画像周辺の光量の低下、外部パラメータ(カメラ設置時のCMOSセンサーの姿勢)を校正する手法を開発。さらには、スカイラジオメータが測定する輝度の絶対値を使って、カメラの生データを輝度の物理値へ変換する係数の導出手法を開発し、輝度分布を観測する手法を確立した。

図9の左列は、快晴時の写真と輝度分布の測定結果である。図からは分かりにくいだが、太陽の輝度も飽和せずに測定できている。しかし、画像上部に迷光が見られる。このような迷光は、強い点光源を撮影した際に見られるものである。このような迷光は、カメラを太陽追尾装置に搭載し(図8右)、太陽直達光を隠すことで回避することが出来る。

図9の右列は、積雲が散在した時の観測結果である。この時は、太陽を隠して撮影を行った。太陽周辺の雲からの強い散乱光を測定できている。また、積雲底部と側面からの散乱光の違いもはっきりと測定できている。

今後は、このような観測から、雲の三次元放射効果を解析していく予定である。また、カメラが測定する散乱光から、雲の微物理・光学特性を導出し、エアロゾルとの関連性(エアロゾル-雲相互作用)を調べていくことを予定している。

6. まとめ

エアロゾルの3つの光学特性(光学的厚さ、一次散乱アルベド、非対称因子)と、それによる地上日射量の減少量との関連性について、基礎的な説明し、それらの季節変動、数十年規模の長期変動、そして、全球分布について解析例を紹介した。エアロゾルが地上日射を減少させる量は、全球の年平均で約10 W/m²ほどであるが、エアロゾルの時空間変動は大きく、影響が大きい東アジアでは約50 W/m²に達する。また、数十年の規模で変動を続けている。エアロゾルとその影響を監視する観測体制を拡充し、数値モデルによる再現・予測性能を向上させていく必要がある。

参考文献

- 1) T. F. Socker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, and Y. Xia, IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 697-698 (2013), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.
- 2) R. Kudo, A. Uchiyama, A. Yamazaki, and E. Kobayashi, Seasonal characteristics of aerosol radiative effect estimated from ground-based solar radiation measurements in Tsukuba, Japan, J. Geophys. Res., 115 (2010), D01204, doi: 10.1029/2009JD012487.
- 3) M. Hess, P. Koepke, and I. Schult, Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC, Bull. Amer. Meteor. Soc., 79 (1998), 831-844.
- 4) T. Nakajima, G. Tonna, R. Rao, Y. Kaufman, and B. Holben, Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, Appl. Opt., 35 (1996), 2672-2686.
- 5) T. Takamura, and T. Nakajima, Overview of SKYNET and its activities, Opt. Pura Apl., 37 (2004), 3303-3308.
- 6) 工藤玲, 入江仁士, 居島修, 高野松美, 竹村俊彦, 西澤智明, 青木一真, 日暮明子, 清水厚, 及川栄治, 山崎明宏, 石田春磨, 早坂忠裕, 2017.11.2, SKYNET データによるエアロゾル

- 組成のリモートセンシング, 日本気象学会 2017 年度秋季大会講演予稿集, 112 (2017), 499, 札幌.
- 7) H. Ishimoto, R. Kudo, and K. Adachi, A shape model of internally mixed soot particles derived from artificial surface tension, *Atmos. Meas. Tech.*, 12 (2019), 107-118, <https://doi.org/10.5194/amt-12-107-2019>.
- 8) M. Wild, Global dimming and brightening: A review, *J. Geophys. Res.*, 114 (2009), D00D16, doi : 10.1029/2008JD011470.
- 9) M. Wild, Enlightening global dimming and brightening, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (2012), 27-37, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00074.1>.
- 10) R. Kudo, A. Uchiyama, O. Ijima, N. Ohkawara, and S. Ohta, Aerosol impact on the brightening in Japan, *J. Geophys. Res.*, 117 (2012), D07208, doi : 10.1029/2011JD017158.
- 11) R. Kudo, T. Nishizawa, A. Higurashi, and E. Oikawa, Remote sensing of aerosols by synergy of CALIOP and MODIS, 28th International Laser Radar Conference, Conf. Proc., doi : <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817608012> (2018).
- 12) 工藤玲, 岩渕弘信, 鷹野敏明, 居島修, 高野松美, 2018.11.1, 日射の輝度分布測定のための全天カメラの開発, 日本気象学会 2018 年度秋季大会講演予稿集, 114 (2018), 438, 仙台.

著者略歴

工藤 玲 (クドウ レイ)

北海道大学理学部地球物理学科, 1997.4-2001.3

北海道大学地球環境科学研究所大気海洋圏環境科学専攻, 2001.4-2003.3

北海道大学大学院環境科学院 博士号取得, 2011.3

気象庁 新潟地方気象台 観測予報課, 2003.4-2005.3

気象庁 気象研究所 第3研究室, 2005.4- 現在